

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 23 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23350072

研究課題名(和文) 吸着ヒートポンプ利用のための高性能二酸化炭素吸着材

研究課題名(英文) High performance CO2 sorbent applicable to adsorption heat pump

研究代表者

加納 博文 (Kano, Hirofumi)

千葉大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60334166

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円、(間接経費) 4,380,000円

研究成果の概要(和文)：遷移金属イオン、配位子、対イオンが異なる7種類の構造柔軟性層状配位高分子が、二酸化炭素吸着においてゲート現象を示すことを各種ガス吸着等温線測定によって明らかにし、その特徴からゲート現象の起源について考察した。ゲート現象に伴う熱量変化をマイクロカロリメータを用いて測定し、ゲート現象に伴う構造変化との関係を明らかにした。これら熱量の値から二酸化炭素の結晶格子内への取り込みにより構造安定化が示唆された。また、二段階ゲート現象を見出し、その構造変化についてモデルを提案した。ELM以外に固体構造の変化を伴って二酸化炭素を取り込む物質系について検討し、ヒートポンプ応用への可能性を考察した。

研究成果の概要(英文)：Gate phenomena, which 7 different elastic layer-structured MOFs (ELMs) consisting of different building blocks show, were examined by measuring gas sorption isotherms at different temperatures. Conditions for the gate phenomenon of each ELM were understood. The double-step gate phenomenon of ELM-11 was examined by measuring gas sorption and X-ray diffraction. Almost the same CO2 sorption amount and interlayer expansion for the 2nd step were obtained for those at the 1st step. This suggested that ELM-11 should involve a double-step swelling reaction even for gaseous CO2 molecules. Sorption and desorption heats for the gate phenomenon of ELM-11 ( $[\text{Cu}(\text{bpy})_2(\text{BF}_4)_2]$ ) were measured. The stabilization of the structure of ELM-11 by CO2 incorporation into the crystal lattice was shown in the gate phenomenon from the energetic viewpoint. Another candidate reaction for a chemical heat pump using CO2 was also found for the CO2 occlusion reaction of Na2CO3 or K2CO3 under moist condition.

研究分野：化学

科研費の分科・細目：複合化学

キーワード：環境関連化学 二酸化炭素吸着 配位高分子 ヒートポンプ

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

## 1. 研究開始当初の背景

吸着ヒートポンプとは、蒸気の吸着の際に発生する吸着熱を温熱として利用し、また、蒸気の脱着の際に奪われる熱を、冷熱として利用するヒートポンプのことである。吸着ヒートポンプは、高い省エネルギー性と高環境性を併せ持つ熱源機器といえる。水蒸気を用いる密閉式吸着ヒートポンプが実用化されている。一方で、ヒートポンプの冷媒として二酸化炭素を利用するヒートポンプが開発されてきているが、従来型の二酸化炭素ヒートポンプはコンプレッサの利用によるヒートポンプであり、電気エネルギーを用いるので、二酸化炭素削減率を飛躍的に向上させることは困難である。そこで温室効果ガスとして排出が制限されている二酸化炭素の固定化と効率的利用のために、密閉式ヒートポンプの冷媒として二酸化炭素を用いることで電気エネルギーをほとんど用いずに二酸化炭素の有効利用と地球温暖化防止につながる技術を提供できる可能性がある。

そのために有望な物質は、二酸化炭素の吸着（あるいは化学反応）の際に、短時間で多くの二酸化炭素と反応し、吸着熱（反応熱）を発生する物質が有効である。すでに提案者らの研究グループではゲート現象に基づき二酸化炭素を効率的に吸着する物質を複数発見している。これらを Elastic Layer-structured Metal-Organic Framework の略を取り ELM と称し、異なる構成要素からなる ELM を区別して命名した。

ゲート現象とは、二酸化炭素の圧力に応じて吸着材の構造を変化させて、あたかもゲートが開くかのように、急激な吸着を示すもので、吸着量と圧力の関係はほぼ垂直に上昇する。ゲート現象では、わずかに圧力を変化させるだけで吸脱着を可能とするので、吸着熱による加熱、脱着熱による冷却が大変効率的に行える。また、地球温暖化にとって問題となる二酸化炭素を密閉式循環系装置に固定でき、有効利用できることで、地球温暖化防止対策に利用できるという大きなメリットがある。吸脱着は圧力だけでなく温度変化によっても制御できる。しかしながら、これら吸着挙動を実際の二酸化炭素吸着ヒートポンプに応用するための基礎研究がなされておらず、不明なことが多い。例えば、二酸化炭素吸着ヒートポンプにおいて最も理想的な吸着様式はどんなものか、ゲート現象における二酸化炭素吸着熱と脱着熱はどれくらいなのかといった、システム設計において重要な事項について、ほとんど検討されてきていない。これら基礎的項目を、複数のゲート現象を示す吸着材について研究する必要がある。表に示し

た7種類のゲート現象を示す吸着材の室温付近における二酸化炭素吸着挙動や、ヒートポンプへの利用のための吸着熱のデータを明らかにしなければならない。また、以前提案者らが報告したとおり、吸着材をエタノールなどで処理することで、ゲート開始圧を低くしたりして、吸着様式を制御することが可能である。

## 2. 研究の目的

以上のように吸着材の構成成分を変化させたり組成を変えたりして、基礎項目を検討することで、理想的な吸着様式を示す吸着材を特定することが可能となる。本研究では、3年間の期間において、これら基礎項目を明らかにすることを目的とした。そこで、各 ELM 試料の二酸化炭素吸着等温線の測定、吸着熱・脱着熱の測定、ゲート現象の機構解明、二酸化炭素吸着ヒートポンプの概念設計、ELM 試料を用いる場合のヒートポンプの熱量評価を行うこととした。

具体的には、7種の ELM 試料について 273 K および 298 K での二酸化炭素吸着等温線を測定することとし、その結果に応じて、二酸化炭素吸着においてゲート現象が見られる ELM 試料の二酸化炭素吸着熱および脱着熱の測定を行った。これらゲート現象の機構を解明するために吸着シミュレーションを併用して、ゲート現象の起源および機構を理解し、新たなゲート型吸着材開発のための根幹を明らかにすることとした。吸着機構と吸着熱および脱着熱を把握することができれば、二酸化炭素吸着ヒートポンプシステムをモデル化することを目指した。さらにそのモデルから熱量の収支を評価し、システム実現のための問題点、改良点を把握し、実用化に向けたシステムを提案することとした。

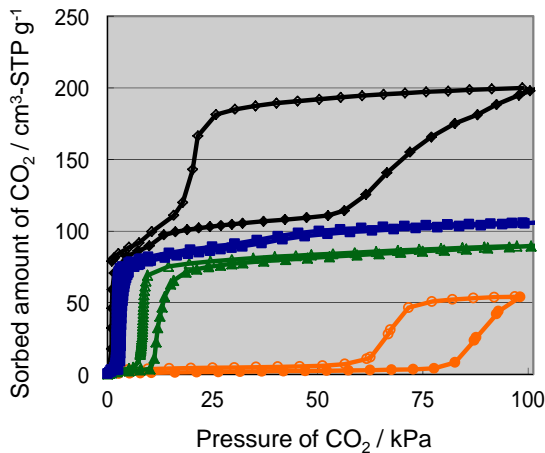
## 3. 研究の方法

本研究では、吸着ヒートポンプシステムを構築するための二酸化炭素吸着材の開発を目的としているので、以下の項目を行うこととした。

## (1) 各 ELM 試料の二酸化炭素吸着等温線の測定

3つの異なる ELM (ELM-11, ELM-12 および ELM-31) は 273 K において全て明らかなゲート現象を示すが、273 K の二酸化炭素吸着では、かならずしもそうではなく、ELM-12 は低い圧力から吸着を示す。これらを含め、先に示した7種の吸着材について、273 K や 298 K における二酸化炭素吸着等温線を測定していないものもあったので、全ての吸着材について測定し、ゲート現象を示すかどうか確かめた。

## (2) ゲート現象の機構解明



**Fig. 1** [Ni(bpy)<sub>2</sub>(BF<sub>4</sub>)<sub>2</sub>]<sub>n</sub> (ELM-31)のCO<sub>2</sub>吸着等温線  
 黒：195 K, 青：210 K, 緑：232 K, 橙：273 K

二酸化炭素吸着に対してゲート現象を示す系において、X線回折(XRD)、赤外吸収分光(IR)などにより構造変化と関連する性質のその場測定を行い、ゲート現象における構造変化を明らかにするとともに、ゲート現象の機構を、平衡論的および速度論的観点から明らかにすることとした。

### (3) 吸着熱・脱着熱の測定

(1)で測定した二酸化炭素吸着等温線において、ゲート現象を示す物質の吸着熱および脱着熱を測定し、ゲート現象を熱量変化の観点から考察するとともに、吸着ヒートポンプシステム構築のための基礎データとした。

また、実験結果を考察する上で重要なミクロレベルの理解を深めるために、分子シミュレーションにより吸着現象の解析および吸着・脱着熱の算定および熱力学的な考察を行うこととした。

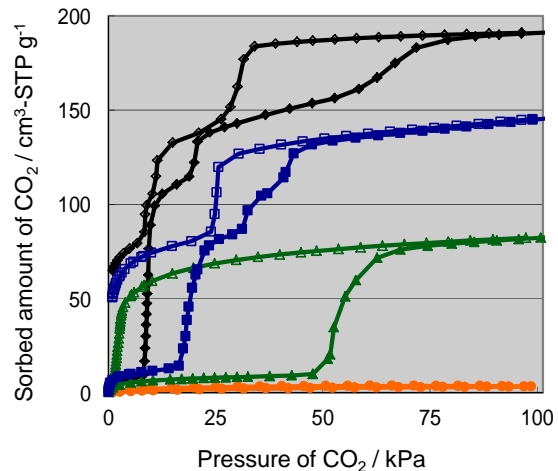
### (4) 二酸化炭素吸着ヒートポンプの概念設計

市販されている既存の水蒸気吸着ヒートポンプ装置をもとに、二酸化炭素を密閉系に固定化した吸着ヒートポンプのモデル化を試みた。このモデルにおいて、ELM試料を用いる場合の吸着ヒートポンプの熱量収支バランスの評価を行い、問題点、課題を理解することとした。これら問題点、課題を克服するための吸着材の選定およびシステムの最適化を進め、より適切な二酸化炭素吸着ヒートポンプ概念設計を行うこととした。

## 4. 研究成果

### (1) 各構造柔軟性層状配位高分子(ELM)試料の二酸化炭素吸着等温線の測定

7種のELM試料について、196 K, 273 Kや298 Kにおける二酸化炭素吸着等温線を測定し、ゲート現象を示すかどうかを確かめた。これら二酸化炭素吸着挙動についてまとめた。その結果、298 K以下では従前から知られている[Cu(bpy)<sub>2</sub>(BF<sub>4</sub>)<sub>2</sub>]<sub>n</sub>が、273 K以下では[Ni(bpy)<sub>2</sub>(BF<sub>4</sub>)<sub>2</sub>]<sub>n</sub> (Fig.1) および



**Fig. 2** [Cu(bpy)<sub>2</sub>(CF<sub>3</sub>BF<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]<sub>n</sub> (ELM-13)のCO<sub>2</sub>吸着等温線  
 黒：195 K, 青：210 K, 緑：232 K, 橙：273 K

[Cu(bpy)<sub>2</sub>(OTf)<sub>2</sub>]<sub>n</sub>, [Co(bpy)<sub>2</sub>(OTf)<sub>2</sub>]<sub>n</sub>系の錯体結晶がそれぞれゲート現象を示した。これら以外のもでもより低温ではゲート現象示すものがあることを明らかにした(232 K以下で[Cu(bpy)<sub>2</sub>(CF<sub>3</sub>BF<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]<sub>n</sub> (Fig.2)、また210 K以下では[Cu(bpy)<sub>2</sub>(OTf)(CF<sub>3</sub>BF<sub>3</sub>)<sub>n</sub> )

### (2) ゲート現象の機構解明

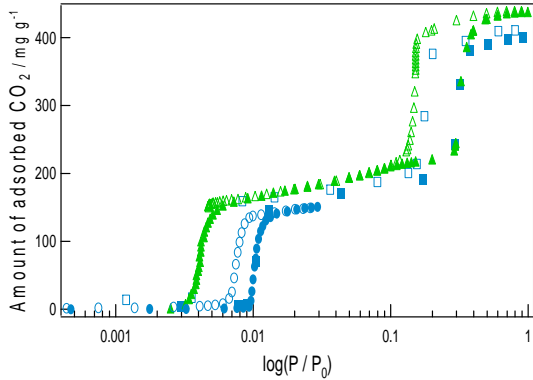
ELM-11の2段階ゲート現象について、195 Kでの常圧までの二酸化炭素吸着等温線と298 Kにおける高圧吸着等温線(Fig.3)を測定し、2段階ゲート現象におけるゲート開閉について吸着量変化と構造変化を調べた。また2段階目の等量吸着熱について計算し、1段階目の等量吸着熱と比較した。2段階目の構造変化も、1段階目と同程度の層間隔を拡張し、二酸化炭素が1段階目と同程度吸収されることがわかった。また、等温吸着熱も1段階目のものとほぼ同程度であることを明らかにした。このように二酸化炭素の吸着は窒素などの分子と異なり、化学量論的な特異吸着が進行して一定の層間拡張が2段階で起こるという結果を得た。

これら各段階におけるX線回折パターンを解析するために、273 Kにおける前処理後と1段階目のゲートオープン後について、詳細に検討し構造パラメータを決定した。それらをもとに195 Kにおける2段階目のゲートオープン後のX線回折パターンを解析した。このような構造変化に対応する分子シミュレーションを行った結果、一層目では30%の層間隔の拡張、2段階目では元の50%の層間隔の拡張と二酸化炭素吸着量が実験結果と良く対応することを明らかにした。

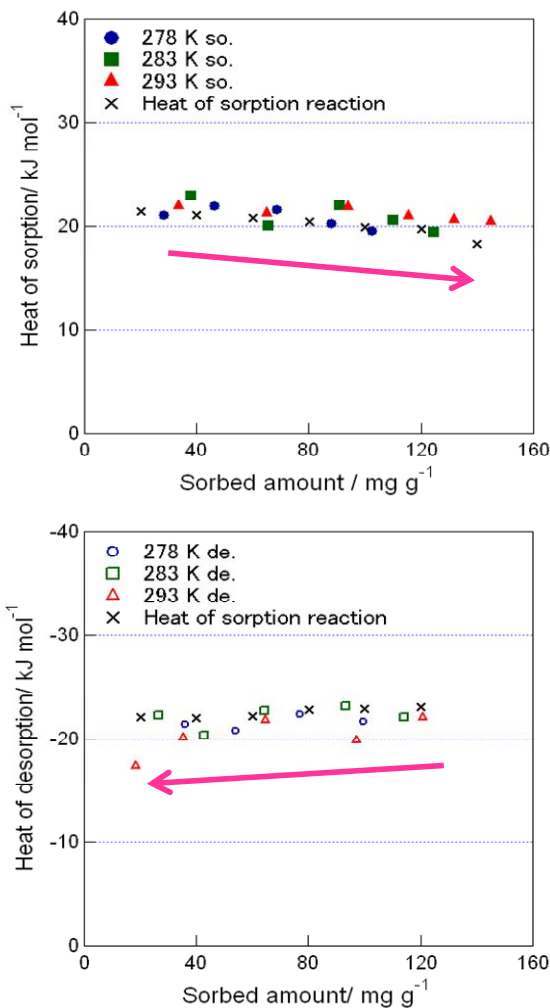
ゲート現象を示す吸着材の特徴を抽出し、ゲート現象の機構と構造との関係を考察した。その結果、フッ素原子が水素結合様の結合をしており、この弱い結合がゲート現象に参与している可能性を示した。

### (3) 吸着熱・脱着熱の測定

(1) の測定結果でゲート現象を示す  $[\text{Cu}(\text{bpy})_2(\text{BF}_4)_2]_n$  および  $[\text{Cu}(\text{bpy})_2(\text{OTf})_2]_n$  について、双子型のセルを備えた東京理工社製伝



**Fig. 3** ELM-11 の  $\text{CO}_2$  吸着等温線 (2 段階ゲート現象) 黄緑：195 K (0 ~ 0.1 MPa) 水色：273 K (0 ~ 3.4 MPa)



**Fig. 4** ミクロカロリメータで求めた ELM-11 の微分  $\text{CO}_2$  吸着熱  
上：吸着，下：脱着；温度：278 K (青)，283 K (緑)，293 K (赤)；× は温度の異なる等温線からファントホッフプロットから求めた反応熱

導熱量型マイクロカロリメータを用い、二酸化炭素の吸着量および脱着量を同時に測定しながら、それぞれ微分吸着熱・脱着熱を測定した (Fig. 4)。得られた値からゲート現象における構造変化との関係を明らかにした。 $[\text{Cu}(\text{bpy})_2(\text{OTf})_2]_n$  はカロリメータで測定できる 278 K ~ 293 K の条件ではゲート現象を示さず、開いたミクロ細孔への吸着に対する吸着熱と脱着熱であり、二酸化炭素の液化熱より非常に大きな値 (約  $25 \text{ kJ mol}^{-1}$ ) を示した。一方、 $[\text{Cu}(\text{bpy})_2(\text{BF}_4)_2]_n$  はゲート現象を示し、構造の変化を伴うにもかかわらず二酸化炭素の気化熱より大きな吸着熱を示し、二酸化炭素の格子内への取り込みにより大きな構造安定化が得られることを示唆した。

通常の物理吸着系における熱的性質との違いを理解するために、異なる大きさのスリット状細孔をもつ活性炭素繊維 (ACF) への 273 K と 298 K における二酸化炭素吸着等温線を測定し、吸着量と等量吸着熱の細孔径依存性を考察した。相対圧が 0.015 までは 0.7 nm より小さな細孔の ACF が高い吸着量を示したが、それより高い圧力ではより大きな細孔の ACF がより高い吸着量をもった。これは小さな細孔径では吸着ポテンシャルが深く低い圧力で立ち上がるが、圧力が高くなると細孔容量が効果的に作用することに起因すると考えられた。2 つの温度における吸着等温線を解析して得た等量吸着熱は、細孔径が大きくなると減少し、等量吸着熱が吸着ポテンシャルの深さに対応することを実証した。これら結果から、ゲート現象を示す ELM-11 の吸着熱は 0.86 nm 程度の細孔径の ACF と同等の吸着熱をもつが、ELM-11 の吸着量は ACF より多いので全熱量はより大きくなり、二酸化炭素吸着ヒートポンプ用の材料として ELM-11 の優位性が明らかになった。

さらに、 $\text{CO}_2$  と水蒸気をとともに吸蔵する炭酸ナトリウムと炭酸カリウムの  $\text{CO}_2$  吸蔵について、評価した。本反応の発熱量は大きいですが、反面、材料の再生 ( $\text{CO}_2$  と水蒸気の脱着) に大きなエネルギーを必要とすることがわかった。本反応は化学反応ではあるが、比較的低い温度で可逆的に進行するので、ケミカルヒートポンプへの応用が期待できる。

#### (4) 二酸化炭素吸着ヒートポンプの概念設計

これまで市販化されている吸着ヒートポンプを用いた吸着式冷凍機やエコキュートとして知られる  $\text{CO}_2$  を冷媒として用いるヒートポンプに対して、ELM-11 が用いる利点について検討した。吸着式冷凍機では  $\text{CO}_2$  を密閉式凝縮 液化室の圧力をおよそ 70 気圧以上にする必要があり、原理的には可能であるが実際的ではない。また、エコキュートにおけるコンプレッサーの大きな電気エネルギーを下げるために吸着反応の熱を利用するという方式が考えられるが、熱交換効率が下

がると予想されるので、実験によって定量的に議論する必要がある。一方、上述の炭酸アルカリ金属塩のCO<sub>2</sub>と水蒸気との反応はケミカルヒートポンプとして、その反応熱の利用を考える方がより効率的であると考えられた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 37 件)

1. T. Ohba, A. Takase, Y. Ohyama, H. Kanoh, Grand canonical Monte Carlo simulations of nitrogen adsorption on graphene materials with varying layer number, *Carbon*, **2013**, 61, 40-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2013.04.061>
2. T. Ohba and H. Kanoh, Energetic contribution to hydration shells in one-dimensional aqueous electrolyte solution by anomalous hydrogen bonds, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2013**, 15, 5658-5663. DOI: 10.1039/c3cp44671a
3. M. Fukano, T. Fujimori, J. Ségalini, E. Iwama, P.-J. Taberna, T. Iiyama, T. Ohba, H. Kanoh, Y. Gogotsi, P. Simon, K. Kaneko, Vertically Oriented Propylene Carbonate Molecules and Tetraethyl Ammonium Ions in Carbon Slit Pores, *J. Phys. Chem. C*, **2013**, 117, 5752 – 5757. [dx.doi.org/10.1021/jp311896q](http://dx.doi.org/10.1021/jp311896q)
4. T. Ohba, S. Taira, K. Hata, H. Kanoh, Mechanism of Sequential Water Transportation by Water Loading and Release in Single-Walled Carbon Nanotubes, *J. Phys. Chem. Lett.*, **2013**, 4, 1211–1215. DOI: 10.1021/jz400218s
5. Y. Nakahigashi, H. Kanoh, T. Ohba, M. Baba, Y. Hattori, N. Inoue, and M. Morimoto, CO<sub>2</sub> Adsorption Properties of Activated Carbon Fibers under Ambient Conditions, *Ads. Sci. Technol.*, **2012**, 30, 621-626. DOI: 10.1260/0263-6174.30.7.621
6. T. Kubo, H. Sakamoto, T. Fujimori, T. Itoh, T. Ohba, H. Kanoh, M. Martínez-Escandell, J. M. Ramos-Fernández, M. Casco, M. F. Rodríguez-Reinos, K. Urita, I. Moriguchi, M. Endo, K. Kaneko, Diffusion-barrier-free porous carbon monoliths as a new form of activated carbon, *ChemSusChem*, **2012**, 5, 2271-2277. DOI: 10.1002/cssc.201200234
7. T. Ohba, K. Hata, H. Kanoh, Significant Hydration Shell Formation Instead of Hydrogen Bonds in Nanoconfined Aqueous Electrolyte Solutions, *J. Am. Chem. Soc.*, **2012**, 134, 17850–17853.
8. T. Ohba, K. Kaneko, M. Yudasaka, S. Iijima, A. Takase, H. Kanoh, Cooperative Adsorption of Supercritical CH<sub>4</sub> in Single-Walled Carbon Nanohorns for Compensation of Nanopore Potential, *J. Phys. Chem. C*, **2012**, 116,

21870–21873. DOI: 10.1021/jp307133m

9. Ohba, T., Kanoh, H., Kaneko, K., Facilitation of water penetration through zero-dimensional gates on rolled-up graphene by cluster-chain-cluster transformations, *J. Phys. Chem. C*, **2012**, 116, 12339-12345. DOI: 10.1021/jp302769m
10. Khoerunnisa, F., Fujimori, T., Itoh, T., Urita, K., Hayashi, T., Kanoh, H., Ohba, T., Hong, S.Y., Choi, Y.C., Santosa, S.J., Endo, M., Kaneko, K., Enhanced CO<sub>2</sub> adsorptivity of partially charged single walled carbon nanotubes by methylene blue encapsulation, *J. Phys. Chem. C*, **2012**, 116, 11216-11222. DOI: 10.1021/jp303630m
11. A. Kondo, N. Kojima, H. Kajiro, H. Noguchi, Y. Hattori, F. Okino, K. Maeda, T. Ohba, K. Kaneko, H. Kanoh, Gas Adsorption Mechanism and Kinetics of an Elastic Layer-Structured Metal-Organic Framework, *J. Phys. Chem. C*, **2012**, 116, 4157–4162. DOI: 10.1021/jp210240x
12. T. Ohba H. Kanoh, Intensive Edge Effects of Nanographenes in Molecular Adsorptions, *J. Phys. Chem. Lett.*, **2012**, 116, 511-516. DOI: 10.1021/jz2016704
13. A. Kondo, H. Kajiro, H. Noguchi, L. Carlucci, D. M. Proserpio, G. Ciani, K. Kato, M. Takata, H. Seki, M. Sakamoto, Y. Hattori, F. Okino, K. Maeda, T. Ohba, K. Kaneko, H. Kanoh, Super Flexibility of a 2D Cu-Based Porous Coordination Framework on Gas Adsorption in Comparison with a 3D Framework of Identical Composition: Framework Dimensionality-Dependent Gas Adsorptivities, *J. Am. Chem. Soc.*, **2011**, 133, 10512-10522. DOI: 10.1021/ja201170c
14. Y. Cheng, H. Kajiro, H. Noguchi, A. Kondo, T. Ohba, Y. Hattori, K. Kaneko, H. Kanoh, Tuning of Gate Opening of an Elastic Layered Structure MOF in CO<sub>2</sub> Sorption with a Trace of Alcohol Molecules, *Langmuir*, **2011**, 27, 6905–6909. DOI: 10.1021/la201008v

他 23 件

[学会発表](計 39 件)

1. 駱 紅超ら, 炭酸カリウムの炭酸水素化反応に及ぼす二酸化炭素濃度の効果, 日本化学会第 94 春季年会, 2014 年 3 月 27 日~3 月 30 日, 名古屋大学(名古屋市)
2. 市川真奈美ら, 構造柔軟性 MOF の二段階 CO<sub>2</sub> 吸収, 第 64 回コロイド及び界面化学討論会, 2013 年 9 月 18 日~20 日, 名古屋工業大学(名古屋市)
3. H. Kanoh et al., Double-step CO<sub>2</sub> Sorption of ELM-11, The 11th International Conference on Fundamental of Adsorption (FOA11), 2013 年 5 月 19 日~24 日, ハイアットリージェンシー

- ホテル (米国ボルチモア)
4. 千應山英之ら, 湿潤条件下における  $K_2CO_3$  の段階的  $CO_2$  吸蔵機構, 第 93 日本化学会春季年会, 2013 年 3 月 23 日, 立命館大学 (草津市)
  5. H. Kanoh et al., Water Sorption Behaviors of Cu-MOFs having Different Dimensional Structures, International Symposium on Zeolites and Microporous Crystals 2012 (ZMPC2012), 2012 年 7 月 29 日, アステルプラザ (広島市)
  6. H. Kanoh et al., The Third Symposium on Future Challenges for Carbon-based Nanoporous Materials: Adsorption and Energy (3rd CBNM) (招待講演) 2012 年 5 月 27 日, 信州大学 (長野市)
  7. H. Kanoh et al., Water Sorption on a Two-Dimensional Cu-MOF having a Flexible Structure, International Association of Colloid and Interface Scientists, Conference 2012 (IACIS2012), 2012 年 5 月 15 日, 仙台国際センター (仙台市)
  8. 本木拓也ら, 構造柔軟性銅配位高分子錯体および同組成 3 次元錯体の特異的水蒸気吸着, 第 25 回日本吸着学会研究発表会, 2011 年 11 月 11 日, 沖縄産業支援センター (那覇市)
  9. H. Kanoh, Calorimetric Study on  $CO_2$  Capture by Elastic Layer-structured MOFs, 2011 BIT Nano-S&T (招待講演), 2011 年 10 月 26 日, World EXPO Center (中国大連)
  10. H. Kanoh, Elastic Layer-structured MOF (ELM) のゲート現象のメカニズム, 「ナノ界面・空間の化学」セミナー (招待講演), 2011 年 9 月 12 日, 長崎大学文教キャンパス (長崎市)
  11. 杉浦 光ら, 構造柔軟性 MOF の二酸化炭素吸収熱測定によるゲート現象の解明, 第 63 回コロイドおよび界面化学討論会, 2011 年 9 月 9 日, 京都大学吉田キャンパス (京都市)
  12. 加納 博文ら, 柔軟な構造をも Cu-MOF カラムによる選択的二酸化炭素分離, 第 63 回コロイドおよび界面化学討論会, 2011 年 9 月 7 日, 京都大学吉田キャンパス (京都市)
  13. H. Kanoh, Selective  $CO_2$  Separation of an Elastic Layer-structured MOF with a Sorption Column, 5th International FEZA Conference, 2011 年 7 月 4 日, Valencia Conference Centre (バレンシア, スペイン)
  14. H. Kanoh, Adsorption of Lysozyme on Carbon Aerogels from Aqueous Solution, CARBON2011, 2011 年 6 月 26 日, 華東理工大学 (中国上海)
  15. H. Kanoh, Nanoscale carbon cage-encapsulated metal-organic framework, 9th International Symposium on

Characterization of Porous Solids, 2011 年 6 月 6 日, International Congress Center Dresden (ドレスデン, ドイツ)  
他 24 件

〔図書〕(計 1 件)

1. 加納博文, 現代界面コロイド科学の事典, 日本化学会編, -2 2.3 p.48-49, 化学同人 (2011).

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)  
取得状況 (計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://pchem2.s.chiba-u.ac.jp/jpn/index.html>

6. 研究組織  
(1) 研究代表者

加納 博文 (Hirofumi Kanoh)  
(千葉大学・大学院理学研究科・教授)  
研究者番号: 60334166